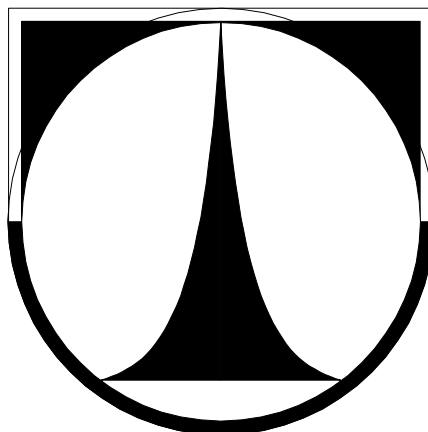


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2009**

**Křístek Jindřich**

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Katedra materiálu  
Obor 3911R018 Materiály a technologie  
Zaměření Materiálové inženýrství

### Zbytková napětí po broušení strojních součástí

### Residual stress after grinding of a machine parts

Jindřich Křístek

**KMT – B - 151**

Vedoucí bakalářské práce:  
Konzultant bakalářské práce:

doc.Ing. František Stuchlík, CSc.  
RNDr. Jiří Malec –PCS s.r.o. Žďár nad Sázavou

#### **Rozsah práce a příloh:**

<b>Počet stran</b>	<b>38</b>
<b>Počet tabulek</b>	<b>3</b>
<b>Počet příloh</b>	<b>1</b>
<b>Počet obrázků</b>	<b>13</b>

**Datum:13.12.09**

## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 13.12.09

Podpis:

**ANOTACE**  
**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**  
**Katedra materiálu**

Studijní program:	2341 – Strojírenství
Obor:	3911R018 Materiály a technologie
Zaměření:	Materiálové inženýrství
Jméno a příjmení:	Jindřich Křístek
Téma bakalářské práce:	Zbytková napětí po broušení strojních součástí
Číslo bakalářské práce:	KMT – B - 151
Vedoucí bakalářské práce:	doc.Ing.František Stuchlík, CSc.
Konzultant bakalářské práce:	RNDr. Jiří Malec –PCS s.r.o. Žďár nad Sázavou

**Abstrakt:** Cílem bakalářské práce bylo doporučení postupu pro kontrolu kvality procesu broušení vačkové hřídele motoru automobilu Škoda Fabia 1,2 HTP. Byl zpracován přehled metod měření zbytkových napětí. Důraz byl kladen na metodu Barkhausenova šumu. Byla provedena měření metodou Barkhausenova šumu a metodou rentgenové difrakční analýzy. Po těchto měřeních byly porovnány výsledky a navržen postup vhodný pro kontrolu kvality procesu broušení.

**Abstract:** The aim of the thesis was to recommend a method that controls the quality of a process of grinding of the camshaft in the engine of a Skoda fabia 1, 2 HTP automobile. A summary of the methods of measuring the residual stress was worked out. The Barkhausen noise method was highlighted. The measurements using Barkhausens noise method and a roentgen diffraction analysis method were carried out. Following these measurements the results were compared and a procedure most suitable for the control of a quality process of grinding was suggested.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

- Barkhausenův šum
- zbytková napětí
- rentgenová difrakční analýza
- nedestruktivní analýza

## **KEYWORDS**

- Barkhausen noise
- residual stress
- roentgen diffraction analysis
- nondestructive analysis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi pomáhali při tvorbě bakalářské práce. Chtěl bych poděkovat panu Ing. Podkovičákovi a Ing. Tláškovi ze Škody Auto a.s. Dále bych chtěl poděkovat panu RNDr. Malcovi za pomoc a rady při provádění experimentu a možnost měření na přístrojích od firmy PCS s.r.o. Také děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Františku Stuchlíkovi Csc. a Ing. Daniele Odehnalové za vstřícnost a pomoc při zpracovávání práce.

Nejvíc bych chtěl poděkovat rodičům za jejich podporu během studia.

## OBSAH

1. ÚVOD .....	10
2. TEORETICKÁ ČÁST .....	11
2.1.Druhy napětí.....	11
2.2.Vznik zbytkových napětí.....	12
2.3.Rozdělení metod měření zbytkových napětí.....	13
2.4.Teoretický výklad vybraných metod.....	13
2.4.1.Odvrtávací metoda .....	13
2.4.2.Rentgenová difrakční analýza .....	16
2.4.3.Metoda Barkhausenova šumu .....	22
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	26
3.1.Úvod do experimentální části.....	26
3.2.Měření metodou Barkhausenova šumu .....	26
3.3.Měření povrchového napětí difrakční analýzou.....	29
3.4.Měření metodou Barkhausenova šumu na mobilním přístroji.....	31
4. DISKUSE VÝSLEDKŮ .....	33
5.ZÁVĚR.....	34
6.SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	36

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Zařízení pro měření zbytkových napětí odvrtávací metodou, tenzometrická růžice a fréza pro měření zbytkových napětí .....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 2: Schéma tenzometrické růžice .....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3: Braggův zákon.....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 4: Systém souřadnic spojený se vzorkem V .....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 5: Schematicky znázorněný princip metody “sin2ψ“ .....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 6: Směry snadné a obtížné magnetizace v krystalech feromagnetických kovů Fe, Ni. ....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 7: Původní Barkhausenovo uspořádání .....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 8: Vačkový hřídel měřený na přístroji STRESSTECH CAM SCAN 300. ....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 9: Snímač přístroje STRESSTECH CAM SCAN 300.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 10: Hodnoty MP z měření na přístroji STRESSTECH CAM SCAN 300. ....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 11: Průběhy hodnot MP na palcích vačkového hřídele .....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 12: Palec vačky se snímačem .....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 13: Fotografie z měření vačkové hřídele na difraktometru XSTRESS 3000 .....</i>	<i>30</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Hodnoty z měření na přístroji XSTRESS 3000 axiálně .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 2: Hodnoty z měření na přístroji XSTRESS 3000 tangenciálně .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 3: Hodnoty z měření na přístroji ROLLSCAN 300 STRESSTECH.....</i>	<i>32</i>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\varepsilon$	-Mřížková deformace
$\lambda$	-Vlnová délka (mm)
$d$	-Mezirovinná vzdálenost (mm)
$\theta$	-Úhlová poloha ( $^{\circ}$ )
$\sigma$	-Napětí (Mpa)
$E$	-Youngův modul (Mpa)
$N$	-Poissonovo číslo
<b>MP</b>	-Magnetoelastický parametr
<b>HTP</b>	-High torque performance (vysoký točivý moment)

# 1. ÚVOD

Broušení materiálu patří mezi nejstarší a zároveň nejpoužívanější dokončovací metody obrábění materiálu. Je to způsob obrábění, kdy břit nástroje není přesně definován. Při snaze dosažení vysoké produktivity dochází k zvyšování řezných podmínek. To může mít za následek poškození povrchu defektem, nazývaným spálenina po broušení. V povrchové vrstvě dochází k napětovým změnám, se kterými musíme počítat. V některých případech vznikají nepříznivá tahová napětí, která způsobují nižší životnost dílů, a mohou vést až k prasklinám u nového dílu. Naším úkolem je navrhnout proces výroby a kontroly tak, aby v povrchové vrstvě byla napětí pokud možno tlaková, a to v rozumném rozsahu.

Jelikož se pohybujeme v sériové výrobě, ke zjištění stavu materiálu budeme používat metody nedestruktivní. Základy nedestruktivních metod zkoušení byli položeny v 18. a 19. století, kdy bylo objeveno mnoho fyzikálních zákonů, které dnes využíváme. V problematice zbytkových napětí po broušení budeme používat metody měření, které jsou založeny na těchto fyzikálních jevech. Kombinací těchto metod měření se budeme snažit navrhnout takový postup kontroly výrobku, aby probíhal souběžně s výrobou dílu, a přinášel potřebné informace o jeho vlastnostech, potřebné k optimalizaci procesu broušení.

## **2. TEORETICKÁ ČÁST**

### **2.1.Druhy napětí**

#### **Napětí I. druhu (makroskopická)**

Vzniká díky inkompatibilitě deformací mezi makroskopickými částmi uvažovaného objektu. Předpokládáme je ve velkých oblastech přibližně homogenní, konstantní svým směrem i velikostí. [1]

#### **Napětí II. druhu**

Jsou definována podobně jako napětí I. druhu. Rozdíl je v tom, že objemy, ve kterých napětí uvažujeme, jsou dány velikostí jednotlivých krystalů. To znamená, že ve vícefázových soustavách mohou být krystaly různých fází opačně. [1]

#### **Napětí III. druhu**

Jsou to napěťová pole doprovázející mřížkové poruchy v reálných krystalech. Jsou nehomogenní i v rozsahu několika meziatomových vzdáleností. [1]

#### **Zbytková napětí**

Jsou to napětí v tuhých tělesech, na která nepůsobí žádné vnější síly a v nichž neexistují žádné teplotní gradienty. Zpravidla se ve všech reálných tělesech vyskytuje zároveň větší počet různých druhů zbytkových napětí. U polykrystalických látek rozlišujeme zbytková napětí I., II. a III. druhu. [1]

Zbytková napjatost v každém bodě tělesa je dána superpozicí zbytkových napětí I., II. a III. druhu. Na konstrukční díl má potom toto napětí podobný vliv jako napětí vložené. Na vzniku zbytkových napětí se podílejí nejrozličnější vlivy, dělíme je na procesy mechanické, tepelné, chemické a kombinované. [1]

## **2.2.Vznik zbytkových napětí**

### **Mechanické procesy**

Jsou to procesy, které deformují více povrch materiálu než vnitřek. V našem případě je to broušení, dále například kuličkování, válečkování nebo leštění. V plasticky deformovaném povrchu je po odstranění vnější síly zbytková komprese, ve vnitřku, jež byl deformován mnohem méně, bude zbytkový tah. [1]

### **Tepelné procesy**

Zbytkové napětí po teplotních procesech vzniká účinkem teplotních gradientů např. při kalení, odlévání a sváření. Tepelná napětí jsou často doprovázena také napětím transformačním vznikajícím jako důsledek fázových transformací. [1]

### **Chemické procesy**

Zbytková napětí vznikají i při chemickým procesech jako je oxidace, koroze nebo galvanické pokovování. [1]

### **Kombinované procesy**

Je to kombinace několika procesů. Je typická pro náš případ. Při neideálních podmínkách broušení (opotřeбенý brusný kotouč, velký úběr, špatné chlazení) jsou vyvolány nejen efekty mechanické, ale i výrazné tepelné. Výsledná povaha stavu zbytkové povrchové napjatosti záleží na tom, který z obou efektů převládá. Zatímco mechanické vedou zpravidla k tlakům, tepelné mají za následek tahové napětí. [1]

Ve výrobku je potřeba dosáhnout takového stavu napjatosti, aby nedošlo ani v superpozici s vnějším namáháním k překročení kritického maxima v žádném místě, případně aby se napětí působením vnějších sil snížila. [1]

## **2.3.Rozdělení metod měření zbytkových napětí**

### **Rozdělení podle zásahu do vzorku:**

- destruktivní
- nedestruktivní
- semidestruktivní

### **Rozdělení podle fyzikální povahy metody:**

- mechanické, odvrtávací** (podstatou je měření deformací, které doprovází porušení napěťové rovnováhy při odstranění části objemu vzorku)
- optické** (fotoelasticimetrie)
- magnetické, mikromagnetické** (vychází ze vztahu mezi napětím a některými magnetickými charakteristikami materiálu)
- ultrazvukové** (využívá souvislost mezi rychlostí ultrazvukových vln a napětím)
- difrakční** (rentgenografická a neutronová difrakce)

## **2.4.Teoretický výklad vybraných metod**

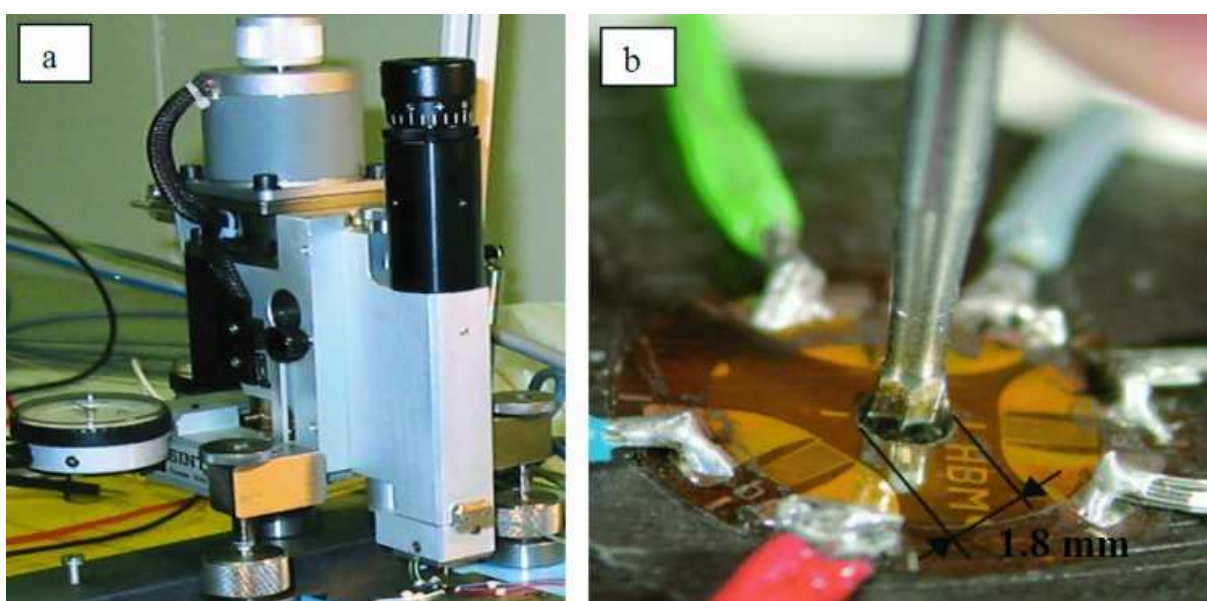
### **2.4.1.Odvrtávací metoda**

#### **Princip metody**

Jedná se o velmi používanou metodu, která má tzv. “semidestruktivní” charakter, díky malému poškození měřeného vzorku. Principem je vyvrtání malého otvoru o průměru a hloubce zpravidla 0,5-1,5 mm. V okolí otvoru se uvolní deformace, které jsou měřeny, a na jejich základě se vyhodnocuje původní zbytkové napětí.

Měří se makroskopické napětí (dvouosá napjatost) v rovině povrchu materiálu do malé hloubky. Lze stanovit i průběh napětí v závislosti na vzdálenosti od povrchu objektu. Měření se provádí pomocí tenzometrické růžice, která umožní zjistit směr hlavního napětí. [3] , [4]

Otvor musí být vrtán tak, aby vrtání mělo minimální vliv na původní zbytková napětí. Toho se dosáhne například použitím pohonu nástroje pomocí vzduchové turbíny, což umožňuje rychlost až  $300\,000\text{ ot. min}^{-1}$ . [3]

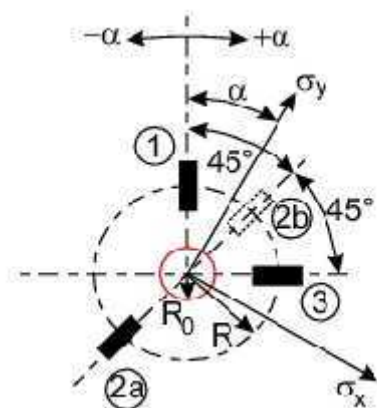


Obrázek 1: Zařízení SINT MTS3000 pro měření zbytkových napětí odvrtávací metodou (a); tenzometrická růžice a fréza pro měření zbytkových napětí (b) [3]

## Zpracování výsledků

Výsledky těchto měření se určují různými metodami v závislosti na podmínkách měření. Záleží na tom, zda je odvrtaný otvor průchozí či nikoliv. Podle toho se poté vypočítávají dle zákonů pružnosti a pevnosti. Z těchto složitých výpočtů se určuje výsledná povaha, velikost a směr napětí.

Dalšími metodami (např. inkrementální metoda, metoda průměrných napětí, integrální metoda, metoda mocniné řady) se určuje průběh nehomogenního napětí pod povrchem v závislosti na hloubce.



Obrázek 2: Schéma tenzometrické růžice [7]

## Použití metody a specifické rysy

Jedná se o velmi rozšířenou a uznávanou metodu. Je to však metoda čistě experimentální, což s sebou přináší řadu nevýhod. Je to metoda časově náročnější, hodící se spíše do laboratorních podmínek, vzorek je částečně poškozen. Pro náš úkol, kontrolní měření vzorků v sériové výrobě, je nevhodná.

## **2.4.2.Rentgenová difrakční analýza**

### **Historie**

Základ zkoušení materiálu prozařováním spočívá v objevu W.C. Röntgena, který v roce 1895 objevil záření pronikající hmotami. Profesor Röntgen objevil tzv. “záření X” a v roce 1898 uveřejnil zákonitosti tohoto druhu záření, fluorescenci, průchod hmotami, fotografické účinky, vznik rozptýleného a sekundárního záření a důkaz o nehomogenitě paprsků. Dále zavádí označení měkkých a tvrdých paprsků, zjišťuje závislost průchodu na tloušťce, hustotě látky a na atomové váze. [1]

Pro měření rentgenovou difrakční analýzou byl podstatný objev Manfreda Haua v roce 1912. Ten objevil interferenci záření na mřížce krystalu a tím potvrdil vlnovou povahu záření. Ta se stala základem krystalografie, ze které vzešla rentgenová difrakční analýza. [1]

Poté vypočítali angličtí fyzikové otec a syn Braggovi jednoduchou rovnici vyjadřující difrakci jednotlivých paprsků. [1]

### **Fyzikální podstata**

Podstatou této metody je využití difrakce (rozptylu) rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdáleností atomových mřížkových rovin vyvolaných napětím. Stanovené deformace přepočteme na napětí pomocí teorie elasticity. [1]

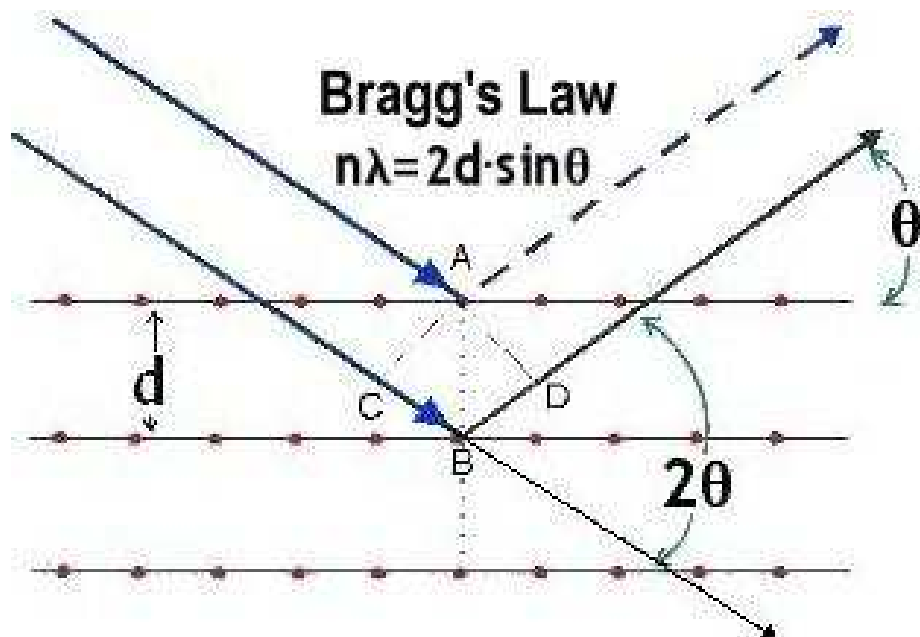
Rozptyl záření na sousedních mřížkových rovinách vede ke vzniku interferenčního maxima ve směru  $\theta$ , pokud je rozdíl drah obou paprsků celočíselným násobkem vlnové délky použitého záření. [1]

*Braggův zákon*

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

*rovnice 1*



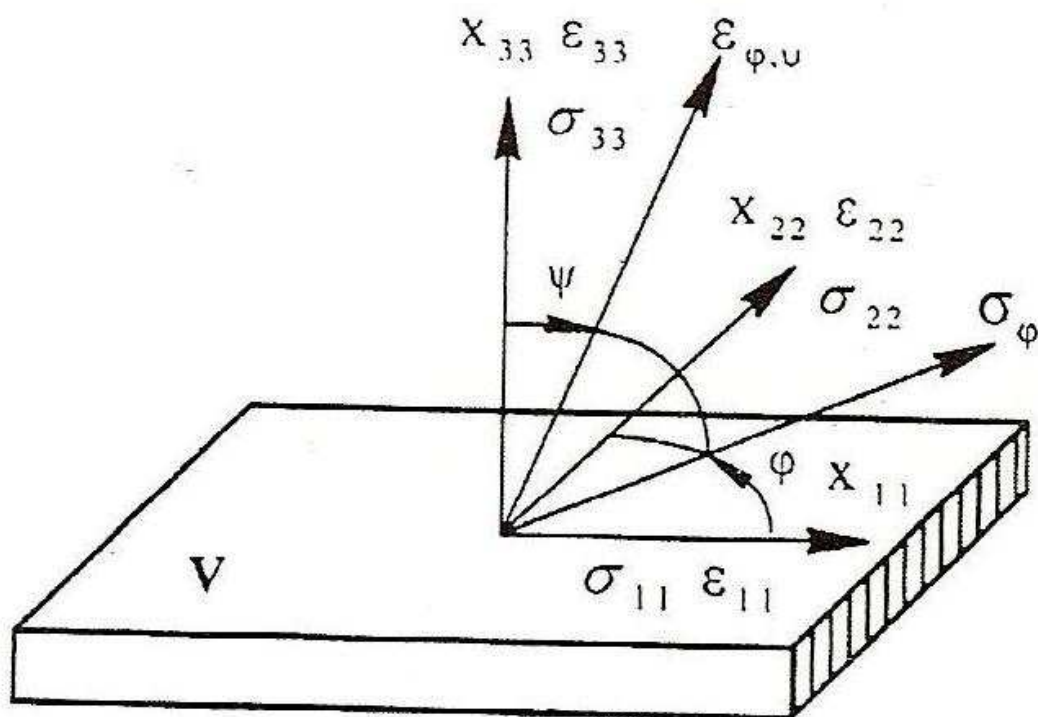


Obrázek 3: Braggův zákon [9]

Působením mechanického napětí se změní mezirovinná vzdálenost  $d$  a úhlová poloha  $\theta$ , z toho vyplývá:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = -\cotg \theta_0 (\theta - \theta_0) \quad \text{rovnice 2}$$

kde:  $\varepsilon$  - mřížková deformace v napjatém krystalu  
 $(\theta - \theta_0)$  - úhlový posun interferenčního maxima.  
 $\lambda$  - vlnová délka  
 [1]



Obrázek 4: Systém souřadnic spojený se vzorkem V[1]

Je určená souřadnicová soustava spojená se vzorkem. Tenzor napětí se složkami označenými  $\sigma_{ij}$  působí na objemový element vzorku, který splňuje podmínky lineární teorie elasticity. Díky tomu lze mřížkovou deformaci  $\epsilon_{\varphi\psi}$  v jakémkoliv směru určeném úhly  $\varphi$  a  $\psi$  vyjádřit vztahem: [1]

$$\epsilon_{\varphi\psi} = \frac{1}{2}(\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi + \frac{1}{2}s_2(\sigma_{13} \cos \varphi + \sigma_{23} \sin \varphi) \sin 2\psi + \frac{1}{2}E\sigma_{33} + s_1(\sigma_{11} + \sigma_{22})$$

rovnice 3

$$\frac{1}{2} s_2 = \frac{\nu + 1}{E}, s_1 = \frac{-\nu}{E} \quad \text{rovnice 4}$$

kde:  $E$  – Youngův modul  
 $\nu$  – Poissonovo číslo  
 (elastické konstanty zkoumaného materiálu)

Úhel  $\varphi$  charakterizuje směr měření napětí  $\sigma_\varphi$  vzhledem k ose  $x_{11}$ ,  $\psi$  je úhel mezi osou  $x_{33}$  a směrem deformace  $\varepsilon_{\varphi\psi}$ .

Při dvouosém stavu napjatosti, kdy  $\sigma_{i3}=0$ , a po substituci:

$$\sigma^\varphi = \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi \quad \text{rovnice 5}$$

Bude vztah lineární závislosti mezi mřížkovou deformací  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  a  $\sin^2 \psi$ :

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1}{2} s_2 \sigma_\varphi \sin^2 \psi + s_1 (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad \text{rovnice 6}$$

Derivací podle  $\sin^2 \psi$  dostaneme:

$$\frac{\partial \varepsilon_{\varphi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} = \frac{1}{2} s_2 \sigma_\varphi \quad \text{rovnice 7}$$

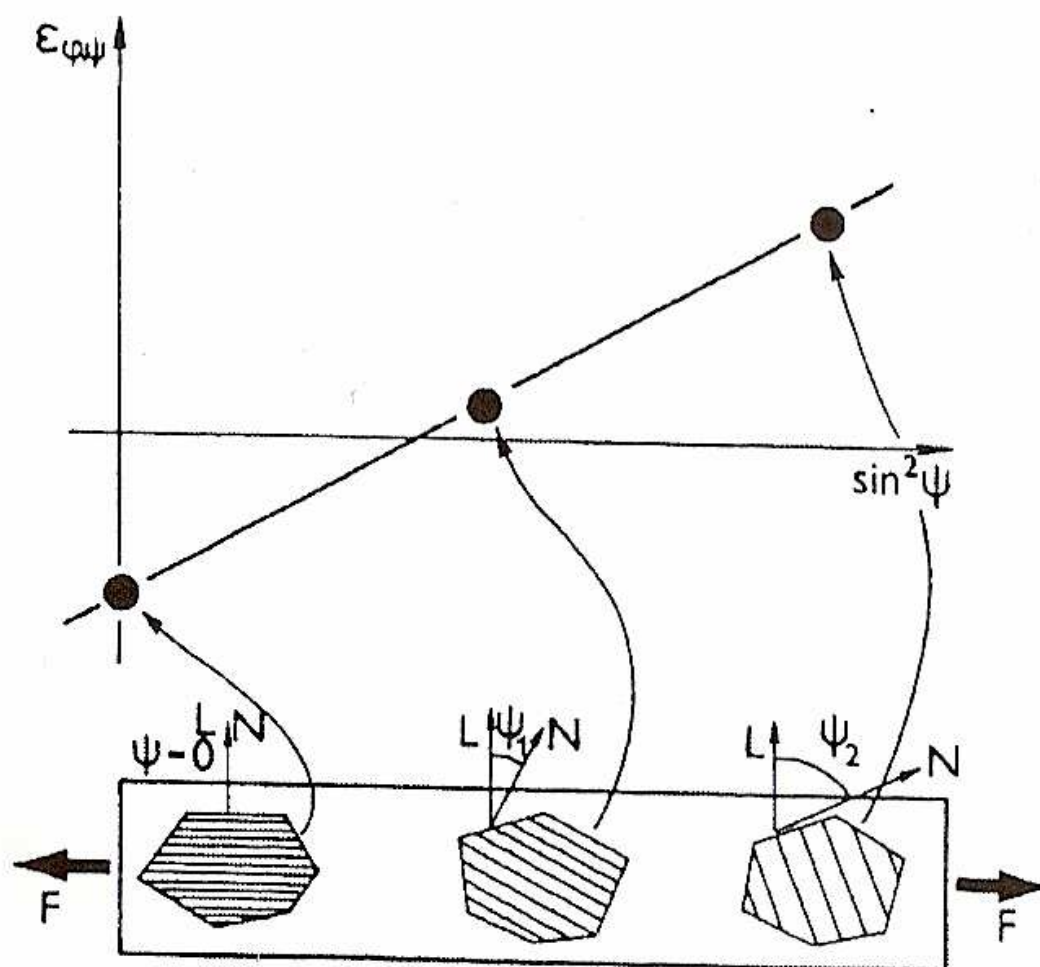
Z toho vyplývá, že směrnice přímky  $\varepsilon_{\varphi\psi}(\sin^2 \psi)$  je dána elastickými konstantami  $E$ ,  $\nu$  a působícím napětím  $\sigma_\varphi$ . Základní rovnici rentgenografického měření napětí dostaneme ztotožněním mřížkové deformace  $\varepsilon$  s deformací  $\varepsilon_{\varphi\psi}$ . Toto měření nazýváme tzv. metodou “ $\sin^2 \psi$ ”: [1]

$$\varepsilon_{\varphi\psi} - \cot g \theta_0 (\theta - \theta_0) = \frac{1}{2} s_2 \sigma_\varphi \sin^2 \psi + s_1 (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad \text{rovnice 8}$$

Z těchto vztahů získáme vzorec pro výpočet složky napětí  $\sigma_\varphi$ :

$$\sigma_\varphi = -\frac{1}{2} s_2 \cot g \theta_0 \frac{\partial \varepsilon_{\varphi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} \quad \text{rovnice 9}$$

Rentgenografické stanovení složky  $\sigma_\varphi$  metodou “ $\sin 2\psi$ ” vyžaduje dostatečně přesné určení úhlové polohy  $\theta_{\varphi\psi}$  interferenčních linií získaných difrakcí na vhodných systémech atomových mřížkových rovin  $\{hkl\}$  v azimutální rovině  $\varphi = \text{konst.}$  Při různých hodnotách úhlu  $\psi$ . [1]



Obrázek 5: Schematicky znázorněný princip metody “ $\sin 2\psi$ ” [1]

## Výhody a specifické rysy rentgenové difrakce

Rentgenografické měření zbytkových napětí se odlišuje od ostatních několika rysy. Umožňuje měření mezirovinové deformace z různých směrů vzhledem k povrchové normále zkoumaného objektu. [1]

Ve strukturní rentgenografii používáme rentgenové záření s určitou vlnovou délkou, z toho vyplývá, že můžeme získávat informace z velmi tenké povrchové vrstvy. Tato vrstva je zpravidla  $10^{-3}$  až  $10^{-2}$  mm. Pokud chceme získávat informace z větší vzdálenosti od povrchu objektu, musíme použít jiný postup. Nabízí se odstraňování povrchové vrstvy materiálu, zpravidla odleptáváním, metoda ale poté ztrácí nedestruktivní charakter. Další možností je použití neutronové difraktometrie, ta je ale dosti nezvyklá, protože neutronové svazky vhodné intenzity mohou být získány pouze z jaderných reaktorů. [1]

Další výhodou difrakce je možnost stanovení napětí na jednotlivých složkách vícefázové soustavy a měřit velmi nehomogenní napěťová pole, díky její selektivní povaze. [1]

Pomocí difrakce můžeme také oddělit napětí I. a II. druhu. Makroskopická napětí totiž linie rozšiřují, makroskopická se projevují změnou jejich polohy.

Nevýhodou difrakční analýzy je možnost použití pouze na krystalické, případně polykrystalické materiály. S rostoucími rozměry krystalů a jejich předností v materiálu klesá spolehlivost a přesnost tohoto měření. [1]

### **2.4.3. Metoda Barkhausenova šumu**

Jedná se o poměrně novou metodu, která je založena na tzv. Barkhausenově šumu. Tento jev je důsledkem chování feromagnetických materiálů v magnetickém poli. Od osmdesátých let 20. století se tato metoda měření rozvíjí, a to zejména v průmyslovém nasazení při hodnocení integrity povrchu. [5], [6]

#### **Historie**

V roce 1919 v práci nazvané “Dvě pozoruhodnosti objevené pomocí nového zesilovače“, popsal jev později nazývaný Barkhausenův šum profesor Barkhausen. Tento jev spočívá v tom, že přiblížíme-li nebo vzdálíme magnet od jádra, je v reproduktoru slyšitelné chrastění či praskání. Tento šum souvisí s nespojitostmi v procesu magnetizace feromagnetika. Později se ukázalo, že efekt závisí na tvrdosti ocelového jádra v cívice (s rostoucí tvrdostí intenzita praskání klesá). Bylo zjištěno, že tahové napětí ve směru magnetizace stimuluje výrazné chrastění, zatímco tlakové napětí působí opačně. [5], [6]

Rozvoj elektroniky v sedmdesátých letech způsobil, že se z tohoto jevu stala průmyslově používaná metoda detekce strukturních a napěťových změn v materiálech. Použití nachází v hodnocení integrity povrchu po obrábění nebo tepelném zpracování. [5], [6]

#### **Vysvětlení jevu**

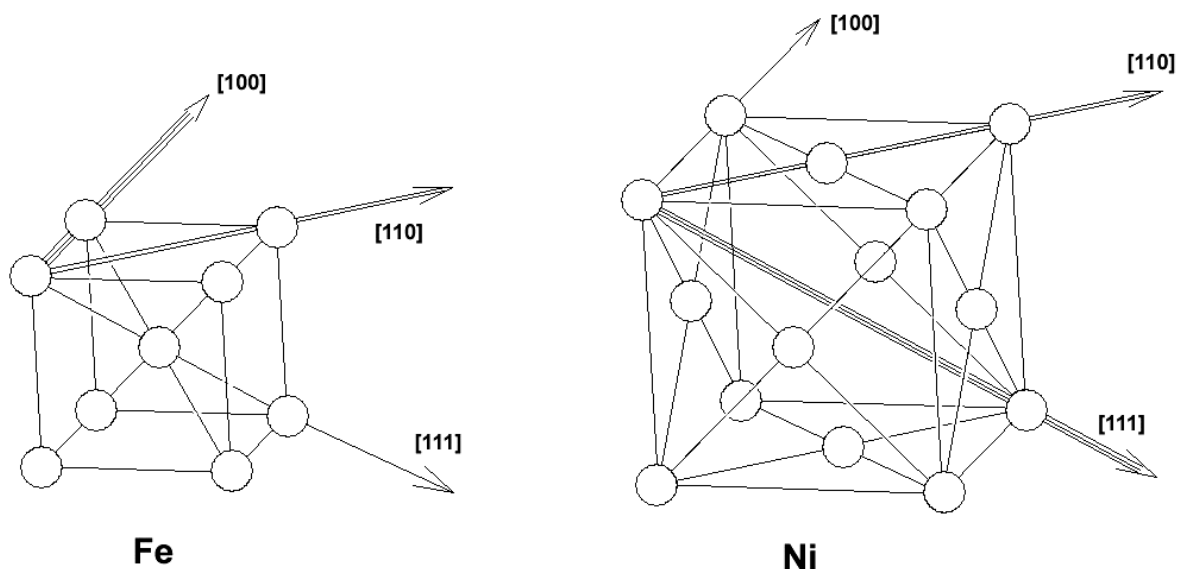
Feromagnetické materiály jsou složeny z malých magnetických oblastí podobných tyčovým magnetům, které nazýváme Weissovy domény. U železa  $\alpha$  je magnetizace nejsnazší ve směru kterékoli hrany elementární krychlové buňky (směry  $\langle 100 \rangle$ ), u niklu ve směru tělesové úhlopříčky krychle ve směru  $\langle 111 \rangle$ . Domény jsou od sebe odděleny hranicemi, kterým se říká doménové stěny. Vnější magnetické pole přitom způsobuje pohyb doménových stěn. Aby se doménová stěna mohla pohnout, doména na jedné straně se musí zvětšit a doména na druhé straně se zmenšit. Důsledkem je potom změna v celkové magnetizaci vzorku. Když

je cívka z vodivého drátu umístěna blízko vzorku v době, kdy se doménová stěna pohybuje, související změna magnetizace vzorku indukuje v cívkce elektrický puls. [5], [6]

Na intenzitu signálu Barkhausenova šumu mají vliv dva důležité materiálové parametry. Je to přítomnost a rozložení pružných napětí, která ovlivňují cestu, po které se domény ubírají směrem ke snadné orientaci ve směru magnetizace. Tento jev, kdy elastické vlastnosti ovlivňují doménovou strukturu a magnetické vlastnosti se nazývá magnetoelastická interakce. V důsledku magnetoelastické interakce u materiálů s pozitivní magnetostrikcí tlakové napětí snižuje intenzitu Barkhausenova šumu, tahové napětí ji naopak zvyšuje. Díky této skutečnosti můžeme využít měření intenzity Barkhausenova šumu ke stanovení zbytkového napětí. Z tohoto měření můžeme určit i směr základních napětí. [5], [6]

Dalším parametrem, který ovlivňuje úroveň Barkhausenova šumu, je metalurgická struktura. Tento jev můžeme vidět na vlivu tvrdosti materiálu na měření. S rostoucí tvrdostí intenzita signálu spojitě klesá. Z toho vyplývá, že měření Barkhausenova šumu poskytuje i informaci o mikrostrukturním stavu materiálu.

U železa  $\alpha$  je méně snadné zmagnetování ve směru úhlopříčky (směry  $\langle 110 \rangle$ ) a nejobtížnější ve směru tělesové úhlopříčky (směry  $\langle 111 \rangle$ ). [5], [6]

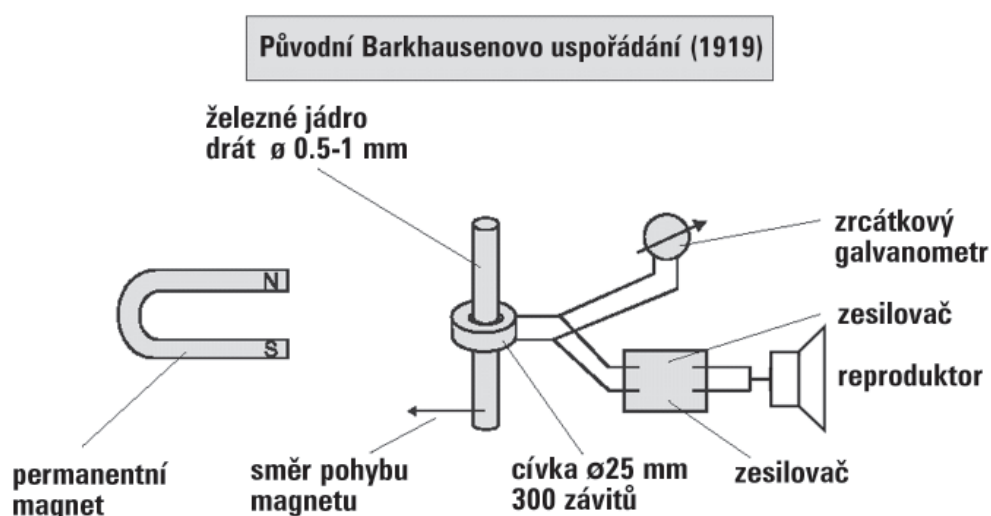


Obrázek 6: Směry snadné a obtížné magnetizace v krystalech feromagnetických kovů Fe, Ni.  
Trojitá, dvojitá nebo jednoduchá čára šipky znamená vždy jeden z možných směrů, v němž je magnetizace nejsnadnější, obtížnější nebo nejobtížnější. [5]

Pro většinu feromagnetických materiálů má Barkhausenův šum frekvenční spektrum začínající na magnetizačním kmitočtu a končící na frekvenci okolo 250kHz. Signál je exponenciálně tlumen v závislosti na vzdálenosti, kterou projde uvnitř materiálu. Hlavní příčinou tlumení jsou vířivé proudy indukované při šíření signálu vznikajícího pohybem domén. Tento útlum určuje hloubku, ze které můžeme získávat informace. Tuto hloubku ovlivňuje zejména frekvenční rozsah generovaného signálu, vodivost a permeabilita zkoušeného materiálu. Měřicí hloubka se pohybuje u běžných aplikací mezi 0,01 až 1,5mm. [6]

## Přístroj

Pro představu je postačující původní uspořádání, které použil prof. Barkhausen při prvotních pokusech s touto metodou. Nynější přístroje jsou samozřejmě mnohem sofistikovanější. Zpravidla sestávají z kalibrační jednotky, měřicí a řídicí jednotky a měřícího počítače. Pro jednotlivá měření je důležitým prvkem přístroje snímač. Ten může být přizpůsoben pro konkrétní účel svým tvarem. Vždy však obsahuje dvojici feromagnetických břitů, kdy jeden slouží k magnetizaci, zatímco druhý snímá odezvu. [5], [6]



Obrázek 7: Původní Barkhausenovo uspořádání [6]



## **Kalibrace**

Pro provádění měření se musí do přístroje nahrát kalibrační křivka, pomocí které se přepočítávají hodnoty Barkhausenova šumu na příslušná napětí. Kalibrace se provádí na kalibračním zařízení, skládajícím se ze dvou na sobě nezávislých polohovacích zařízení určených k ohýbání kalibračního vzorku ve dvou nezávislých směrech. Jako kalibrační vzorek se používá kalibrační kříž. Kalibrační kříž je polepen tenzometry ve dvou směrech, aby bylo možné měřit ohybové napětí. Nad vzorkem je umístěn kalibrační snímač měřící hodnoty Barkhausenova šumu. Na základě známého napětí a velikosti Barkhausenova šumu je možné přiřadit velikost napětí příslušné hodnotě Barkhausenova šumu. [6]

## **Použití metody a její specifické rysy**

Je to metoda nedestruktivní, což můžeme využít v provozních podmínkách. Je vhodná pro kontinuální kontrolu dílu při sériové výrobě. Jelikož je měřen magnetoelastický parametr MP, který závisí na více parametrech, je nutné při každé změně ve výrobě (obrábění, tepelné zpracování, materiál) provádět kalibraci, nebo jiné měření (např. difrakční analýzu) k určení přípustné hranice MP. Nevýhodou této metody měření je omezení pouze na feromagnetické kovy.

### **3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

#### **3.1.Úvod do experimentální části**

V této části bylo cílem změření zbytkových napětí na vačkové hřídeli vozu Škoda 1,2 HTP. Tato hřídel je dodávána jako polotovar, je již tepelně zpracovaná, ve Škodě se již pouze provádí broušení. Po broušení se u vybraných kusů provádí kontrolní měření pomocí metody Barkhausenova šumu. Toto měření se provádí na stroji STRESSTECH CAM SCAN 300.

Při měření jedné vačkové hřídele byly naměřeny odlišné hodnoty magnetoelastického parametru oproti jiným kusům. Tento kus byl tedy podroben kontrolnímu měření pomocí metody rentgenové difrakční analýzy. Toto měření bylo provedeno na stroji XSTRESS 3000.

Po tomto měření byl pro zajímavost díl změřen pomocí mobilního přístroje k měření Barkhausenova šumu. Šlo o přístroj ROLLSCAN 300 STRESSTECH.

Měření bylo provedeno na vačkové hřídeli pro vůz Škoda 1,2 HTP. Číslo dílu 03D 109 101 P.

#### **3.2.Měření metodou Barkhausenova šumu**

Základní měření metodou Barkhausenova šumu je prováděno po broušení hřídele na přístroji umístěném v lince. Jedná se přístroj STRESSTECH CAM SCAN 300. Zde je vačková hřídel upnuta do hrotů(viz obr.) a pomocí snímače měřen postupně každý palec vačky po celém obvodu. Toto měření je digitálně zaznamenáváno, přičemž se ukládají hodnoty magnetoelastického parametru. Nejpodstatnější je maximální a průměrná hodnota pro každý palec.



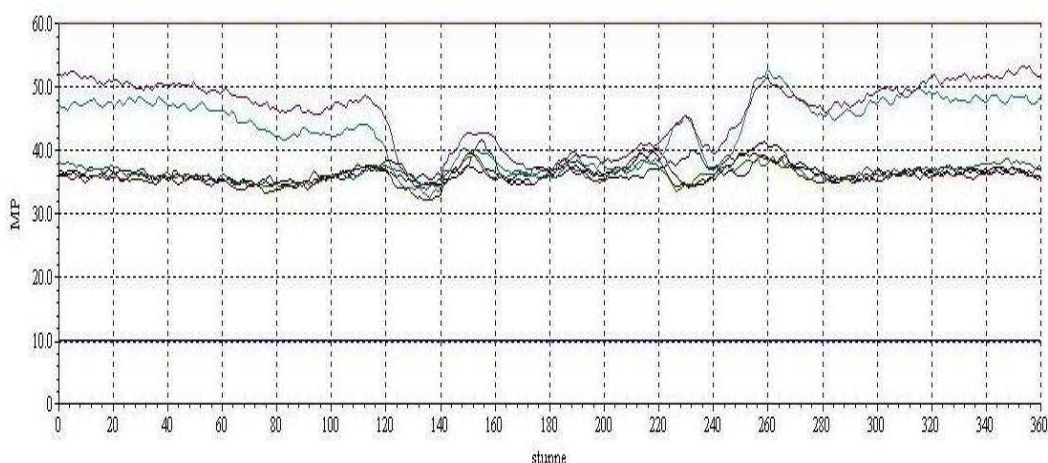
Obrázek 8: Vačkový hřídel měřený na přístroji STRESSTECH CAM SCAN 300 [9]



Obrázek 9: Snímač přístroje STRESSTECH CAM SCAN 300 [9]

Jméno	S	Max	Omezit	V	Min	Prům	Odch	PočB...	Max/Min	Max/P...	Min/Pr...	Max-Min	K
Záznam 1	A	41.80	60.00	155	34.40	36.68	1.52	336	1.22	1.14	0.94	7.40	1
Záznam 2	A	40.20	60.00	232	34.20	36.37	1.05	335	1.18	1.11	0.94	6.00	1
Záznam 3	A	39.20	60.00	152	33.70	36.52	1.15	335	1.16	1.07	0.92	5.50	1
Záznam 4	A	52.70	60.00	260	32.50	43.48	4.87	335	1.62	1.21	0.75	20.20	1
Záznam 5	A	40.40	60.00	214	32.20	36.04	1.52	335	1.25	1.12	0.89	8.20	1
Záznam 6	A	53.20	60.00	354	33.90	45.88	5.14	335	1.57	1.16	0.74	19.30	1

Obrázek 10: Hodnoty MP z měření na přístroji STRESSTECH CAM SCAN 300

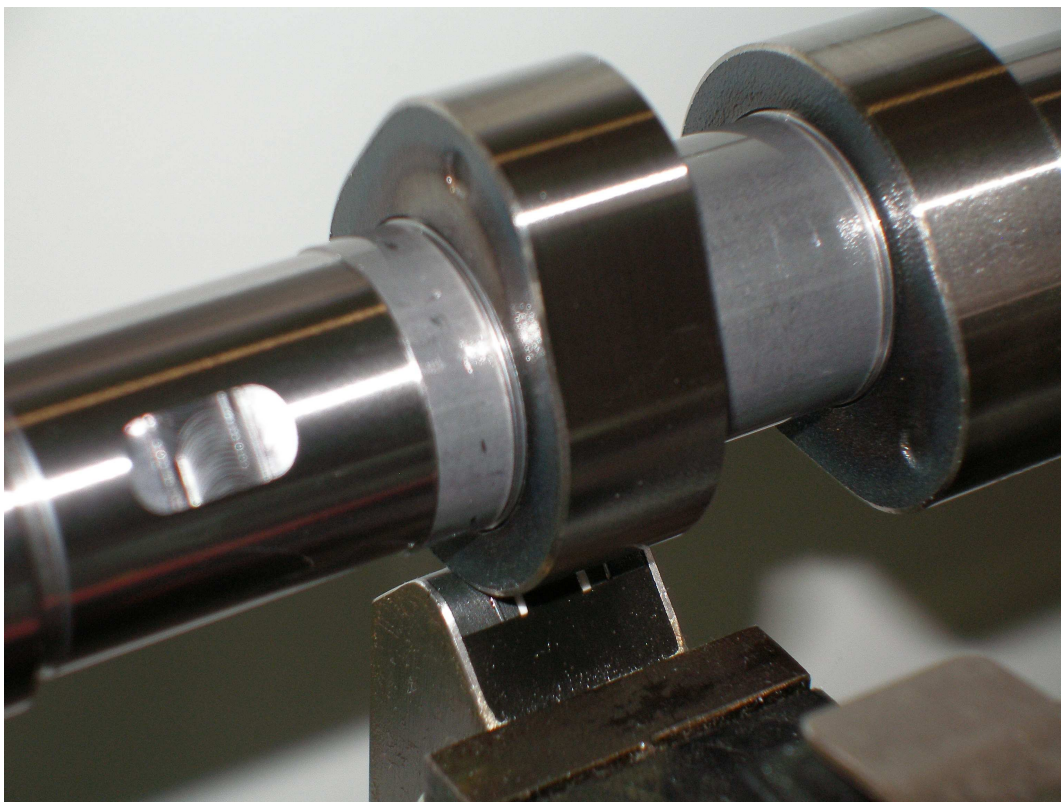


Obrázek 11: Průběhy hodnot MP na palcích vačkového hřídele

## Závěry měření metodou Barkhausenova šumu

Ze zaznamenaných hodnot je vidět, že na čtvrtém a šestém palci vačkové hřídele byli naměřeny vyšší hodnoty magnetoelastického parametru, a to jak maximální, tak průměrné. Jelikož je měřen magnetoelastický parametr namísto konkrétního zbytkového napětí, zaměřím se na tyto dva palce a změřím, zda vyšší hodnoty magnetoelastického parametru, které jsem dostal, znamenají, že se jedná o vadný kus, či nikoliv. To zjistím následnou difrakční analýzou.





*Obrázek 12: Palec vačky se snímačem [9]*

### **3.3. Měření povrchového napětí difrakční analýzou**

Toto měření bylo prováděno na mobilním difraktometru XSTRESS 3000. Jelikož při měření Barkhausenova šumu byli naměřeny zvláštní hodnoty na čtvrtém palci, zaměřím se právě na něj.

Jelikož to přístroj umožňuje, změřím zbytkové napětí ve dvou směrech. Je to směr axiální (tj. kolmý na směr broušení) a směr tangenciální (tj. ve směru broušení). Ve směru axiálním bylo provedeno měření v deseti bodech. Ve směru tangenciálním bylo po úvaze měření provedeno pouze ve čtyřech bodech, a to byl nos vačky, základní kružnice, a obě tečny. Při měření jsem odečítal hodnoty zbytkového napětí na povrchu vzorku a šířku paprsku v polovině maxima (ve stupních). Soustředím se na napětí I. druhu, tj. makroskopické napětí.

Pomocí této metody získávám informace o napětí z hloubky 5-10  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 13: Fotografie z měření vačkové hřídele na difraktometru XSTRESS 3000 [10]

### Měření v axiálním směru:

Tabulka 1: Hodnoty z měření na přístroji XSTRESS 3000 axiálně

BOD MĚŘENÍ	NAPĚTÍ [MPa]	ŠÍŘKA PAPRSKU [°]
1)NOS	-774±35	5,33±0,040
2)	-683±18	5,35±0,047
3)TEČNA	-623±30	5,13±0,070
4)	-710±22	4,92±0,048
5)	-675±24	4,92±0,050
6)ZÁKLADNÍ KRUŽNICE	-677±31	4,95±0,036
7)	-695±22	4,96±0,043
8)	-701±20	4,95±0,028
9)TEČNA	-695±27	5,32±0,043
10)	-700±56	5,07±0,015

## Měření v tangenciálním směru:

*Tabulka 2: Hodnoty z měření na přístroji XSTRESS 3000 tangenciálně*

BOD MĚŘENÍ	NAPĚTÍ [MPa]	ŠÍŘKA PAPERU [°]
1)NOS	-633±27	5,14±0,056
3)TEČNA	-459±17	5,12±0,028
6)ZÁKLADNÍ KRUŽNICE	-556±22	4,88±0,039
9)TEČNA	-474±48	5,21±0,020

## Závěry měření pomocí difrakce

Změřil jsem čtvrtý palec vačky, u kterého jsem měl podezření na možnost většího zbytkového napětí. Podařilo se změřit napětí na důležitých bodech, ve dvou směrech. Naměřené hodnoty ukazují, že zbytkové napětí na povrchu vzorku má záporné znaménko, tzn. je to napětí tlakové. Z této skutečnosti spolu s velikostí napětí vyplývá, že měřený vzorek je v pořádku.

## 3.4.Měření metodou Barkhausenova šumu na mobilním přístroji

Měření bylo prováděno na mobilním přístroji ROLLSCAN 300 STRESSTECH. Měřen byl tzv. magnetoelastický parametr, čili bezrozměrné číslo. To může ukázat nerovnoměrnosti na povrchu vzorku- na signál má vliv mechanické napětí a

tvrdost. Pro měření konkrétních hodnot mechanického napětí by musela být provedena kalibrace.

Měření bylo prováděno, stejně jako u difrakční analýzy, na čtvrtém palci vačkového hřídele. Jelikož je snímač ke vzorku přikládán ručně, bylo měření provedeno jen ve čtyřech nejdůležitějších bodech, a to na nose vačky, na základní kružnici a na obou tečnách. Stejně jako u difrakční analýzy, měřil jsem ve dvou směrech- ve směru broušení(tangenciálně) a kolmo na směr broušení(axiálně).

## Měření

Před měřením jsem zaznamenal údaje, které byli nastavené na přístroji:

Magnetizace: 10,0 Vpp

Mag. frekvence: 125 Hz

Frekvenční filtr: 70-200 kHz

Použitý senzor: AST 3030

MP při běhu naprázdno byl v rozmezí 8,2 – 8,5.

*Tabulka 3: Hodnoty z měření na přístroji ROLLSCAN 300 STRESSTECH*

BOD MĚŘENÍ	MAGNETOELASTICKÝ PARAMETR	
	AXIÁLNĚ	TANGENCIÁLNĚ
1) NOS	30,2	48,2
2) TEČNA	35,4	41,7
3) ZÁKL. KRUŽNICE	36,6	59,7
4) TEČNA	33,3	47,7



## 4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Získal jsem hodnoty z měření na třech přístrojích, z čehož dva pracovaly na základě metody Barkhausenova šumu, a jeden na principu rentgenové difrakce. Vycházel jsem z hodnot naměřených při prvním měření na přístroji STRESSTECH CAM SCAN 300. Zaměřil jsme se na čtvrtý palec vačky, jelikož na něm byl naměřen vyšší MP.

Čtvrtý palec jsem tedy důkladně proměřil na přístroji XSTRESS 3000. Rentgenovou difrakcí jsem změřil konkrétní zbytkové napětí, a to ve dvou směrech. Napětí se měnilo v závislosti na místě měření, a také na směru měřeného napětí. Rozsah hodnot nebyl vysoký. Hodnoty povrchového napětí oscilovaly mezi 620 - 775 MPa u měření ve směru kolmém na směr broušení, a mezi 460 - 635 MPa u měření ve směru broušení. Z toho je patrné, že zbytkové napětí na povrchu vzorku bylo vyšší ve směru kolmém na směr broušení. Také mohu říci, že změřené napětí bylo nejvyšší na nosu vačky, zatímco nejnižší na tečně (rovné části) spojující základní kružnici s obloukem nosu vačky. Zjištěné hodnoty ukázali, že povrchové napětí je zcela vyhovující. Bylo totiž vždy tlakové, což je obecně u strojních součástí vyžadováno, a jeho velikost je pro nás přijatelná.

Následně bylo provedeno měření na mobilním přístroji ROLLSCAN 300 STRESSTECH. Toto měření již mělo pouze potvrdit předchozí měření. Hodnoty MP naměřené na čtyřech místech čtvrtého palce vačky, opět ve dvou směrech, potvrdili, že zbytkové povrchové napětí je vyšší ve směru kolmém na směr broušení než ve směru shodném, a také, že je nejvyšší na nose vačky.

Když shrnu celkové výsledky, dostanu se k tomu, že vačka, tedy palec který jsme měřili, je v pořádku. Z hlediska zbytkového napětí na povrchu vzorku tedy není důvod, aby byl kus vyřazen.

## 5. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navržení vhodného postupu kontroly vačkových hřídelů z hlediska povrchových zbytkových pnutí po broušení.

V teoretické části jsou shrnuty základní principy vzniku zbytkových napětí a jejich rozdělení. Byl zpracován přehled metod, které se používají pro měření zbytkových napětí, včetně jejich fyzikálního výkladu. Důraz byl kladen na metodu Barkhausenova šumu, jelikož je to metoda měření, která není ještě zcela zažitá, ovšem poskytuje mnoho výhod a to zejména pro kontrolu ve výrobě, která je pro nás podstatná.

V experimentální části jsem vycházel z principů a metod popsaných v části teoretické. Soustředil jsem se na napětí I. druhu, tj. napětí makroskopické. Pouze u měření pomocí rentgenové difrakční analýzy jsem pro zajímavost zaznamenal rozšíření paprsku v maximu, které se týká napětí mikroskopického. Provedl jsem měření zbytkového povrchového napětí perspektivní metodou Barkhausenova šumu na dvou různých přístrojích a měření metodou rentgenové difrakční analýzy.

S přihlédnutím k výsledkům těchto měření můžu doporučit optimální postup pro kontrolu zbytkových napětí po broušení vačkových hřídelů. Jako optimální se jeví kombinace metod Barkhausenova šumu a rentgenové difrakční analýzy. Kombinací těchto metod dostaneme výhody obou-tj. rychlost a praktičnost v provozu Barkhausena, a přesné měření konkrétních hodnot u difrakce.

Postup by byl takový, že by přístrojem STRESSTECH CAM SCAN 300 byly měřeny vačkové hřídele kontinuálně bezprostředně po broušení. Ovšem je nutné určit hranici MP, do které je zkoumaný vzorek vyhovující, a nad ní již musí být vyřazen jako neshodný kus. Tuto hranici musíme určit metodou rentgenové difrakce, třeba na mobilním difraktometru XSTRESS 3000, který byl používán při našem experimentálním měření.

Při výrobě by tedy mohl být optimalizován celý proces broušení. Byli by používané řezné podmínky takové, aby byla dostatečná produktivita, a MP udržován na přijatelné hodnotě. Signál Barkhausenova šumu by se tak tedy stal

jakýmsi ukazatelem kvality procesu broušení. Při zvyšující se hodnotě MP a jeho přibližování k mezní hodnotě by jsme viděli, že nějaký z elementů ovlivňující MP se zhoršuje. Jedná se například o brusný kotouč, který po opotřebení více tepelně zatěžuje obrobek.

Zásadou tohoto postupu kontroly ovšem je, že musíme udržovat všechny činitele mimo proces broušení, které mají vliv na velikost MP, na stejné hodnotě. To znamená, že polotovar vačkové hřídele, musí být vždy ze stejného materiálu a tepelně zpracováván tak, aby se žádný kus neodchyloval ze standartu. Kdyby bylo tepelné zpracování nespolehlivé a jakost kusů různá, bylo by i celé kontrolní měření zbytkového napětí na povrchu vzorku velice zkreslené.

Závěr, ke kterému jsem došel, je takový:

- 1) Navrhuji pro kontrolní měření kombinaci přístrojů na principech měření Barkhausenova šumu a rentgenové difrakce.
- 2) Postup měření bude takový, že se pomocí difraktometru určí přípustná hranice MP. Ten se bude měřit na přístroji pro měření Barkhausenova šumu, přímo ve výrobě, bezprostředně po procesu broušení.
- 3) MP se bude sledovat, jeho hodnota bude udržována pod hraniční hodnotou. Při přibližování k této hodnotě budou prováděny úpravy podmínek broušení tak, aby byl MP na stabilní hodnotě.
- 4) Tento postup může být použit jak pro kontrolu vačkových hřídelí, pro které jsme prováděli měření, tak i pro kontrolu čepu klikových hřídelí.

..

## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1]- Bernard Kopec a kolektiv. Nedeštruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Brno 2008, ISBN 978-80-7204-591-4
- [2]- Difrakce rentgenového záření na krystalu. 2009, <http://praktika.fjfi.cvut.cz/>
- [3]- Ing. Tomáš Skopeček, Ph.D., doc. Ing. Petr Hofmann, CSc. Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézování. 2. 11. 2007, <http://www.mmspektrum.com/>
- [4]- Západočeská univerzita v Plzni. Měření napětí a zbytkových napětí. 14. 2. 2007, <http://tpt.zcu.cz/>
- [5]- Jiří Petrželka. TEORIE TVÁŘENÍ I. 16. 5. 2006, <http://www.345.vsb.cz/jiripetrzelka/Texty/TTI.pdf>
- [6]- RNDr. Jiří Malec. Informační materiály firmy PCS. 2009
- [7]- Ing. Karel Doubrava Ph.D. Principy odvrtávací metody. 2006, <http://bulletin-am.cz/>
- [8]- Doc. Ing. Miloš Vlk CSc. Experimentální mechanika. Brno 2003, <http://www.umt.fme.vutbr.cz/>
- [9]- Ing. Josef Podkoviček. Fotografie přístroje *STRESSTECH CAM SCAN 300*

## **PŘÍLOHY**

V příloze přikládám pro zajímavost protokol z geometrického kontrolního měření. Jedná se o měření Fourierova koeficientu. Ze záznamu je patrné, že měřený kus byl vyřazen tzv. “na vrásky”.

